第30卷 第7期
2016年7月

材 料 研 究 学 报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH

Vol. 30 No. 7
July 2016

铸辗成形环坯热压缩过程中晶粒的取向和织构演变*

秦芳诚 李永堂

(太原科技大学材料科学与工程学院 太原 030024)

摘 要 在不同变形温度和应变速率为0.1 s^{-1}条件下研究了砂型铸造和离心铸造Q235B环坯的热压缩变形行为, 并使用电子背散射衍射(EBSD)技术分析其晶粒取向和织构的演化特点。结果表明: Q235B环坯的晶粒在1000℃尺寸较小, 有少量仍保持铸造状态的晶粒, 组织演变的机理为动态回复和大应变几何动态再结晶; 离心铸造环坯中有22%集中在20°-50°的大角度晶界。在1100℃再结晶充分, 晶粒趋于等轴状; 晶界取向差分布仍呈现典型的双峰特征, 大角度晶界的比例为60%-75%。在1000℃砂型铸造Q235B的织构组态, 为少量沿着<001>//ND取向线分布的{001}<100>立方织构和{001}<110>织构; 在1100℃主要是高斯织构{110}<001>和沿着<110>//ND向{110}<001>方向移动并聚集的旋转立方织构{110}<110>。在1000℃离心铸造环坯的织构组态为旋转立方织构{110}<110>和铜型织构{112}<111>, Copper织构沿着ε-取向线分布; 在1100℃主要为{001}<110>织构和沿着γ取向线由黄铜R{111}<112>向{111}<110>转变的织构, 再结晶的程度高, 取向密度大。

关键词 金属材料, 铸态Q235B环坯, EBSD, 晶粒取向, 织构, 再结晶

分类号 TG142, TG115.2 文章编号 1005-3093(2016)07-0509-08

Evolution of Grain Orientation and Texture of Ring Shaped Blank Induced by Hot Compression During Casting-rolling Process

QIN Fangcheng LI Yongtang**

(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

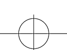
*Supported by National Natural Science Foundation of China Nos.51135007&51174140&51205270, Doctoral Program of Higher Education of China No.20111415130001, and Research Project Supported by Shanxi Scholarship Council of China No.2011-084.

Manuscript received August 7, 2015; in revised form December10, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (0351)2776633; E-mail: liyongtang@tyust.edu.cn

ABSTRACT The characteristics for the evolution of grain orientation and texture of ring shaped blanks of sand- and centrifugal-casting Q235B respectively were investigated by electron backscatter diffraction (EBSD) technique, while the blanks have been subjected to hot compression with a strain rate of 0.1 s^{-1} at different temperatures. The results show that the grain size of the blanks after hot compression at 1000℃ becomes smaller in the deformed microstructure, but a few grains maintains as in cast state. The mechanisms of the microstructure evolution may be ascribed to dynamic recovery and large strain geometric dynamic recrystallization. For centrifugal cast ones, the percentage of high-angle boundary in 20°-50° is 22%, but after hot compression at 1100℃ it shows a homogenous microstructure with equiaxed grains because of sufficient recrystallization, while the mis-orientation distribution of grain boundaries still presents a typical characteristic of double-peaks and the proportion of the high-angle boundaries reaches to 60%-75%. The textures of sand casting Q235B are a small amount cube texture {001}<100> and {001}<110> along <001>//ND at 1000℃, while the main textures are Goss texture {110}<001> and r-cube texture {110}<001> at 1100℃. For centrifugal casting ones at 1000℃, {110}<110> and Cu texture {112}<111> dis-

* 国家自然科学基金51135007、51174140、51205270, 高校博士项目20111415130001和山西省回国留学人员2011-084资助。
2015年8月7日收到初稿; 2015年12月10日收到修改稿。
本文联系人: 李永堂
DOI: 10.11901/1005.3093.2015.185



tributes along ε orientation; at 1100℃ the types of texture including {001}<110> and {111}<110> transformed from {111}<112> along γ orientation. The orientation density is higher due to the high extent of recrystallization.

KEY WORDS metallic materials, as-cast Q235B ring blank, EBSD, grain orientation, texture, recrystallization

在环件径轴向双向辗扩协调变形中芯辊的进给运动使变形区材料经历压缩应力状态, 而且驱动辊和芯辊的摩擦会限制环件承受剪切应力。在近内层和外层边缘材料变形的兼容性明显导致环件中层的剪切变形, 端面锥辊孔型内材料的应力状态又因上锥辊进给或限制作用变得复杂。因此, 复杂的变形状态和应力状态及其不可预知性将导致复杂的织构演变, 一旦形成织构将呈现明显的各向异性, 反过来影响环件的成形工艺性能(包括变形体的各向异性力学性能)。因此, 在环件辗扩中复杂的变形机制可通过变形过程中织构的演化来分析[1, 2]。

国内外众多学者从织构的角度研究材料的热轧(热辗)过程, 并通过对轧后微观组织和再结晶行为的分析实现了组织与性能控制[3, 4]。织构是由于滑移和孪生使晶粒取向发生转动形成的, 织构特征定量反映塑性变形微观组织的演变特点, 且其分布和类型与再结晶有关[5]。在辗扩变形时环件的织构、取向和再结晶方式都因温度、应变速率、应力状态和辗扩比等外部条件的变化而有所区别, 而晶粒取向和织构与组织演变相互影响。Jeong[6]用EBSD和X-ray技术研究了热轧温度对极低碳含Ti无间隙钢组织和织构的影响, 揭示{100}<011>织构在厚度方向上呈不均匀分布。Ryttberg等[7]分析了矩形截面环件冷辗扩过程微观组织和织构的演变, 并通过实验手段研究不同厚度处的织构, 发现环件中心和近外层区域出现的α和γ织构取决于该区域的压应力状态, 而近内层区域出现的{110}织构与剪切状态有关。

在铸辗复合成形中基于铸坯的热辗扩变形行为和组织演变均明显不同于锻态材料的热(或冷)辗扩变形, 高质量、高性能的环形铸坯是新工艺成形的关键[8, 9]。虽然先进的离心铸造工艺可为环件铸辗复合成形提供性能优良的铸坯, 但是环坯铸态组织的热塑性差, 组织不均匀以及辗扩时变形不均匀等因素导致最终环件的组织、织构及性能沿厚度方向不均匀分布并呈现明显的各向异性。因此, 通过热压缩研究其热变形及组织演变行为极为重要。在铸坯环件热压缩或辗扩过程中晶粒细化和织构强化或软化是改善其热塑性和组织的常用方法, 动态再结晶则是晶粒细化的重要方式, 其主要类型包括连续动态再结晶(CDRX)、旋转动态再结晶(RDRX)和非连续动态再结晶(DDRX)等[10-12]; 使用EBSD技术能在得到材料宏观择优取向的同时得到单个晶粒的取向以及与相邻晶粒的取向差, 并用取向分布函数(ODF)图定性描述织构的组态组成[13]。由此可见, EBSD对分析变形过程中织构和取向的演变提供了有力手段, 能将多晶体材料的显微组织、微区成分和结晶学数据分析结合起来, 建立晶界结构、取向和织构等与多晶体性能的定量与半定量关系[14, 15]。本文对砂型铸造和离心铸造生产的Q235B环坯进行高温轴向压缩, 用EBSD技术研究在相同应变速率和不同变形温度下微观组织晶粒取向、取向差分布以及织构组态组成, 以揭示变形过程中微观结构的演变规律。

1 实验方法

实验用Q235B环坯是采用铸辗成形中砂型铸造和离心铸造生产的[16, 17], 其化学成分(质量分数, %)为: C0.2, Mn0.9, Si0.32, S0.042, P0.036, N0.0045, 其余为Fe。环坯的尺寸为ϕ270 mm × ϕ105 mm × 45 mm。在环坯壁厚近中层区域位置取样, 然后加工成直径10 mm, 高15 mm的圆柱试样, 其轴线与环坯半径方向平行。在Gleeble-3500热模拟机上进行轴对称热压缩, 根据铸环坯热辗扩工艺参数的分析, 确定热压缩变形温度分别为1000℃和1100℃, 应变速率为0.1 s^{-1}, 真应变1.2。

将热压缩后的试样迅速水淬, 并沿压缩轴向对半剖开, 经研磨、机械抛光后在饱和苦味酸溶液中腐蚀。将EBSD样品用5%高氯酸酒精溶液电解抛光(电压30 V, 电流0.8 A, 时间60 s左右)。用蔡司金相显微镜观察组织, 用ZEISS ULTRA-55型扫描电镜及其安装的HKL-EBSD系统进行微观取向的测定与分析, 以得到所观察区域的取向成像图、极图和取向分布图等信息。选取试样中心大变形区采集EBSD信息, 区域大小为250 μm × 250 μm, 步长为1.5 μm, 使用Channel 5软件分析实验数据。

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

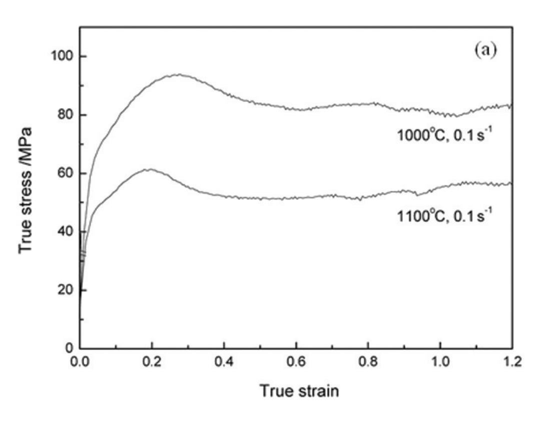
图1给出了砂型铸造和离心铸造Q235B钢在温

度为1000℃和1100℃、应变速率为0.1 s^{-1}条件下真应变1.2时的应力-应变曲线。在所研究的条件下，两种铸造材料的应力-应变曲线都呈典型的动态再结晶型曲线特征，表明动态再结晶是主要的软化机制。在变形初始阶段，位错密度和真应力都随着真应变的增加而急剧增大。随着压缩变形的进行位错在高温动态回复作用下通过攀移和交滑移进行重新排列，胞状组织的胞壁锐化形成亚晶，导致加工硬化程度逐渐减小，表现在真应力-应变曲线上应力增加的速率减小，应力达到峰值。此后，随着真应变的继续增加动态再结晶启动，软化作用占主导，当位错密度增加引起的应变硬化与回复和再结晶产生的软化作用达到动态平衡时，进入稳态变形阶段，表现为应力基本保持不变。

当温度较低(1000℃)时微观组织内部激活能低，回复和再结晶过程进行缓慢，应力峰值出现时所需真应变较大，且两种铸造材料的应力峰值分别达到了97 MPa和93 MPa。温度升高使形变材料的热激活能增大，金属原子热振动变得剧烈，临界剪切应力减小，位错的运动和滑移阻力减小，新的滑移系不断产生，有利于塑性变形的发生；同时，1100℃高温促进亚晶界的迁移，有利于动态再结晶晶粒在晶界处或畸变能较大的区域形核和长大，使应力达到峰值时的应变明显小于1000℃时的应变。在应变速率相同的条件下，两种铸坯材料在1100℃时的真应力没有明显的差别，达到稳态变形阶段后组织演变较稳定，曲线平缓。

2.2 微观组织晶粒取向

砂型铸造和离心铸造的Q235B钢环坯，其热压缩晶粒取向成像图如图2和3所示。可以看出，在应变速率相同的条件下，随着变形温度升高Z参数($Z=\dot{\varepsilon}\exp(Q/RT)$)值减小，再结晶进行得充分，变形更加均匀，动态再结晶晶粒尺寸增大，晶粒趋于等轴状，得到了均匀的等轴状组织。在温度较低下变形相对不均匀，动态再结晶晶粒尺寸较小，有少量保持铸造状态的晶粒，该现象在砂型铸造Q235B钢中较明显(图2a)。表明在低温条件下砂型铸造材料中的疏松组织改善不明显，热塑性仍



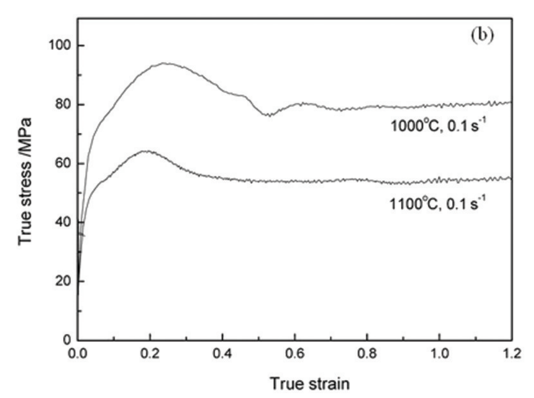


图1 Q235B环坯热压缩真应力-应变曲线

Fig.1 True stress-strain curves of hot compression of Q235B ring blanks (a)sand casting and (b)centrifugal casting

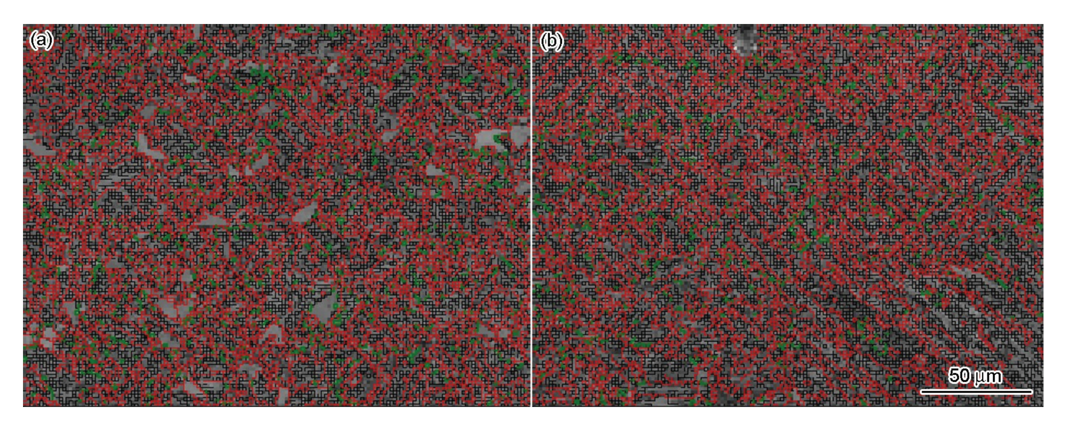


图2 砂型铸造环坯EBSD晶界重构图(红线>15°晶界, 绿线<15°晶界)

Fig.2 Microstructure constructed by EBSD for sand casting (Red line: >15°, green line: <15°) (a) 1000℃/0.1 s^{-1}, (b) 1100℃/0.1 s^{-1}

很差, 变形时晶粒表现出很大的方向性, 组织不均匀; 而离心铸造Q235B钢的致密度相对较高, 在相同条件下塑性变形更充分, 晶粒均匀性较好, 大角度晶界多, 具有连续动态再结晶特征, 如图3(a)所示。

在1000℃下变形时, 两种铸坯的组织演变机理主要为动态回复和大应变几何动态再结晶, 回复和再结晶过程进行缓慢; 而且离心铸造Q235B真应力曲线在稳态变形阶段呈多峰特征(图1b), 表现为CDRX, 与典型低层错能合金的链状动态再结晶模型有所区别。在1100℃动态再结晶是主要的组织演变机制, 动态再结晶晶粒多分布在变形剧烈的晶粒边界及三角晶界处, 组织均匀, 后者的晶粒明显增大。

2.3 取向差分布

图4和5所示为不同变形温度下的相邻晶粒晶界取向差分布图, 均与图2和3中的取向成像图相对应。由图可见, 所有变形组织中晶界取向差

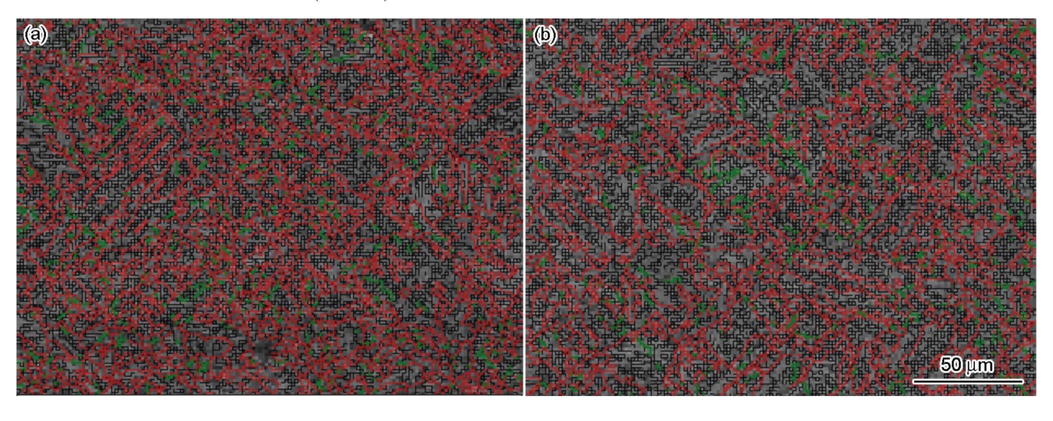


图3 离心铸造环坯EBSD晶界重构图(红线>15°晶界, 绿线<15°晶界)

Fig.3 Microstructure constructed by EBSD for centrifugal casting (Red line: >15°, green line: <15°) (a) 1000℃/0.1 s^{-1}, (b)1100℃/0.1 s^{-1}

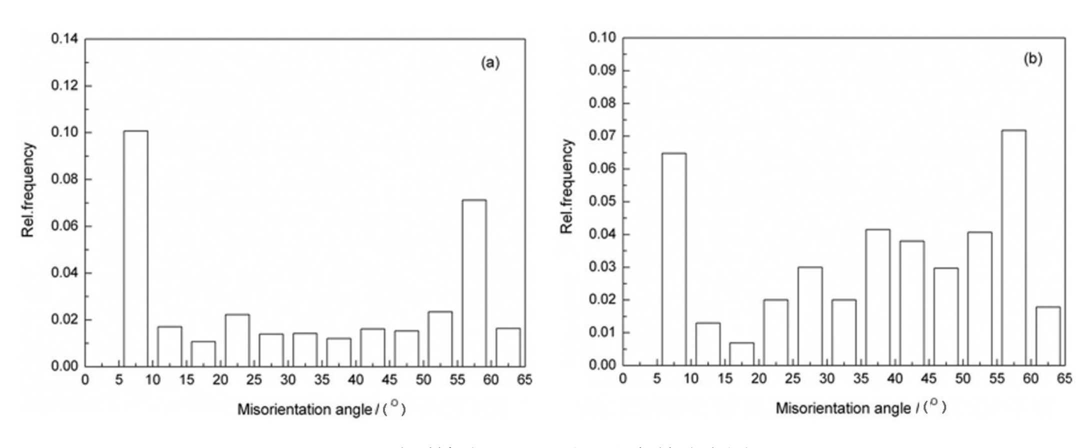


图4 砂型铸造Q235B晶界取向差分布图

Fig.4 Misorientation distribution of sand casting Q235B (a) 1000℃/0.1 s^{-1} and (b) 1100℃/0.1 s^{-1}

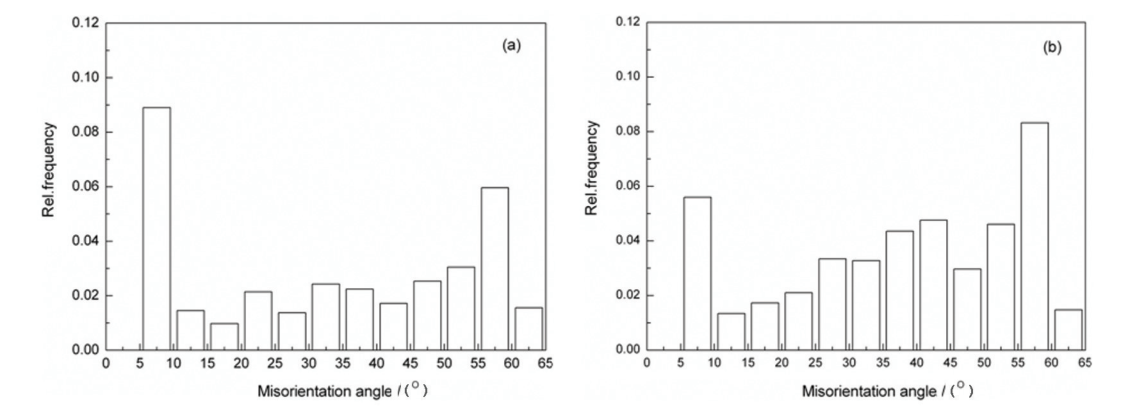


图5 离心铸造Q235B晶界取向差分布图

Fig.5 Misorientation distribution of centrifugal casting Q235B (a) 1000℃/0.1 s^{-1} and (b) 1100℃/0.1 s^{-1}

分布都呈现典型的双峰特征, 即小角度晶界在热压缩过程中向大角度晶界呈不连续特征迁移转变。图 4(a) 和 (b) 表明, 砂型铸造 Q235B 钢在 1000℃热压缩变形达到稳态时含有 15%小角度晶界和 17%集中在 20°-50°的大角度晶界; 而当温度升高至 1100℃大角度晶界所占比例上升为 60%。对于离心铸造 Q235B 钢, 1000℃热变形达到稳态时具有 10%小角度晶界和 22%集中在 20°-50°的大角度晶界; 而温度升高至 1100℃时大角度晶界所占比例上升为 75%(图 5b)。由于温度较高, 组织回复和再结晶充分, 亚晶界通过迁移形成大角度晶界。同时, 离心铸造 Q235B 钢的回复和再结晶作用更加剧烈, 小角度晶界向大角度晶界的转变相对容易, 最终导致在同等变形条件下大角度晶界所占比例较高。

在 1100℃的高温下两种铸态环坯微观组织演变机制主要是动态再结晶, 并伴随少量旋转动态再结晶, 热压缩开始时局部剪切变形使晶粒取向发生变化来达到最佳滑移方向, 使新晶粒具有与原始晶粒不同的晶粒取向分布特点; 当应变速率适中、温度较高时, 有足够的能量和时间促进亚晶的合并和长大, 向大角度晶界渐近转变, 从而形成大量大角度晶界。而 1000℃小角度晶界较多, 发生动态回复和连续动态再结晶, 其中砂型铸造材料伴有几何动态再结晶, 新生的再结晶晶粒主要是亚晶界的逐渐转动形成的, 并且变形完成后的淬火处理使得具有亚晶界的晶核来不及长大, 因此以小角度晶界和 20°~50°的过渡型大角度晶界为主。

2.4 织构分析

2.4.1 取向分布函数图　常用于描述织构的极图或反极图是一个二维平面图形, 而晶体的取向具有三个自由度, 因此需要三维空间中晶体取向分布函数来完整描述[18]。对于立方晶系, 恒 ϕ的取向分布函数图(ODF)取 ϕ_2分别为 0°、45°和 90°的截面具有主要参考价值, 本文取 45°截面进行分析。图 6 和 7 分别给出了砂型和离心铸造 Q235B 钢在不同热压缩条件下的试样中心大变形区的恒 ϕ的 ODF 图。通过与标准 ODF 图对比分析, 得到了环坯的织构种类与分布特征。砂型铸造环坯在 1100℃热变形时出现了高斯织构{110}<001>和旋转立方织构{110}<110>, 表现为旋转立方织构沿着<110>//ND 取向线向{110}<001>方向移动并聚集, 高斯织构的取向密度较大, 约为 8.0, 旋转立方织构的取向密度为 6.0; 而在 1000℃热压缩只出现了少量沿着<001>//ND 取向线分布的{001}<100>

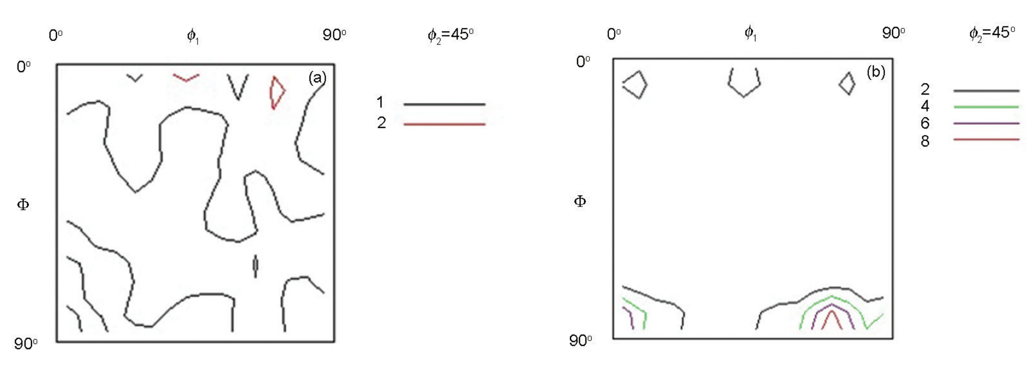


图 6 砂型铸造 Q235B 环坯的 ODF 恒 ϕ_2=45°截面图

Fig.6 ϕ_2=45° section of ODF for sand casting Q235B ring blank (a) 1000℃/0.1 s^{-1} and (b) 1100℃/0.1 s^{-1}

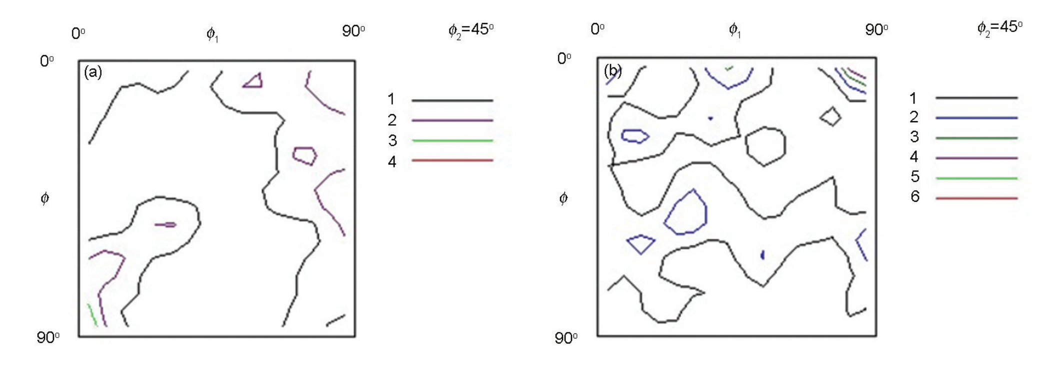
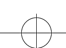


图 7 离心铸造 Q235B 环坯的 ODF 恒 ϕ_2=45°截面图

Fig.7 ϕ_2=45° section of ODF for centrifugal casting Q235B ring blank (a)1000℃/0.1 s^{-1} and (b) 1100℃/0.1 s^{-1}



立方织构和{001}<110>织构, 该类织构的强度较弱, 如图6(a)。图7(a)和(b)表明, 在1000℃/0.1s^{-1}条件下, 离心铸造环坯的热压缩试样中心位置主要为旋转立方织构{110}<110>和铜型织构{112}<111>, 取向密度分别为4.0和2.0, 铜型织构沿着ε-取向线分布; 温度升高至1100℃时出现了取向密度为5.0的{001}<110>织构和{112}<110>织构, 且沿着γ取向线出现{111}<112>黄铜R型织构向剪切类型的织构{111}<110>的转变, 剪切织构的取向密度为6.0; 取向密度的增加与变形过程中再结晶的发生有关。

在不同温度下变形, 试样中心大变形区织构组态变化明显, 这是晶界在热压缩过程中转动的角度不同导致的, 并且受变形时发生的动态、静态再结晶以及回复过程的影响。对于砂型铸造Q235B环坯, 在高温下除了具有强度较弱的{001}<100>织构和{001}<110>织构, 还出现了强度较高的高斯织构{110}<001>和旋转立方织构{110}<110>。对于离心铸造Q235B, 温度升高使Copper织构{112}<111>沿着ε-取向线向{001}<110>织构转动, 还出现了强度较大的剪切织构, 该过程主要受小角度晶界迁移、晶界数量与分布的影响。在再结晶初期由于形变带的作用, <001>//ND纤维中的{001}<100>立方取向晶粒优先形核长大, 随着变形温度的升高再结晶程度加大, 位错滑移、攀移形成的剪切带在再结晶过程中会诱发<110>//RD取向晶粒的优先形核与长大[19, 20]; 在此阶段Q235B砂型铸造环坯较为突出的是{110}<110>取向, 而离心铸造Q235B环坯则是{112}<110>取向。

2.4.2 微观结构极图　图8和9分别给出了两种铸造试样在不同变形条件下的极图, 经过与标准投影图进行比对分析, 发现存在的织构类型与上述ODF图所给出的信息一致。在轴对称压缩时存在c轴方向拉应力或垂直于c轴方向的压应力分量, 出现孪生。对比图8(a)和(b), 温度为1100℃的极密度比1000℃的极密度大, 其原因是在高温下组织演变机制由动态回复转变为再结晶, 动态再结晶程度增加, 织构择优取向和择优核心长大增强。砂型铸造环坯的极图表明, 在1000℃具有简单的{001}<110>织构和{001}<100>立方织构, 但是在1100℃时出现两种极密度较大的旋转立方织构和高斯织构。其原因是, 随着变形温度的升高原子的活动能力增强, 原子间作用力减弱, 位错滑移阻力减小, 大量潜在的滑移系被激活, 且滑移系之间的临界剪切应力差值减小, 结果是砂型铸造Q235B钢的织构组成特征变得复杂, 各种类型的织构的锋锐程度也随之发生了变化; 因此, 在1100℃热压缩不仅发生了孪生, 也发生了锥面和柱面滑移, 形成了两种较强的织构。随着变形温度升高离心铸造Q235B钢的铜型织构沿着ε-取向线向{001}<110>织构移动, {111}<112>黄铜R型织构出现, 并沿着γ取向线向复杂的剪切织构{111}<110>的转变, 择优取向明显, 极密度稍微增

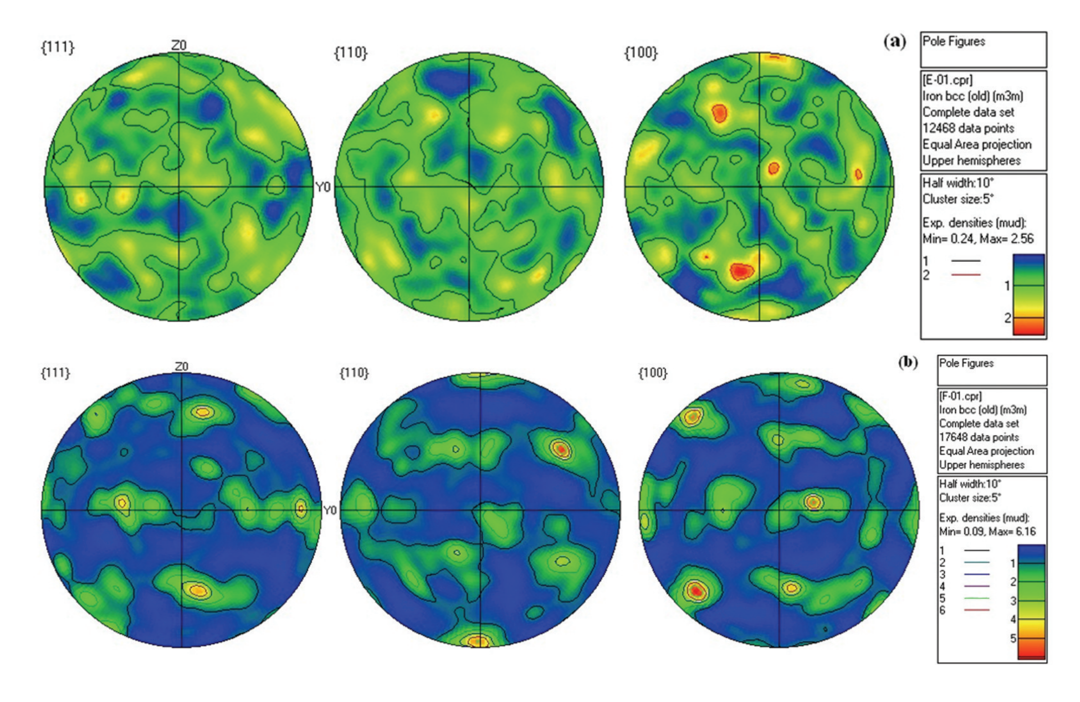


图8 在不同变形条件下砂型铸造环坯的极图

Fig.8 Pole figure of sand casting ring blank under different deformation condition (a) at 1000℃/0.1 s^{-1} and (b) at 1100℃/0.1 s^{-1}

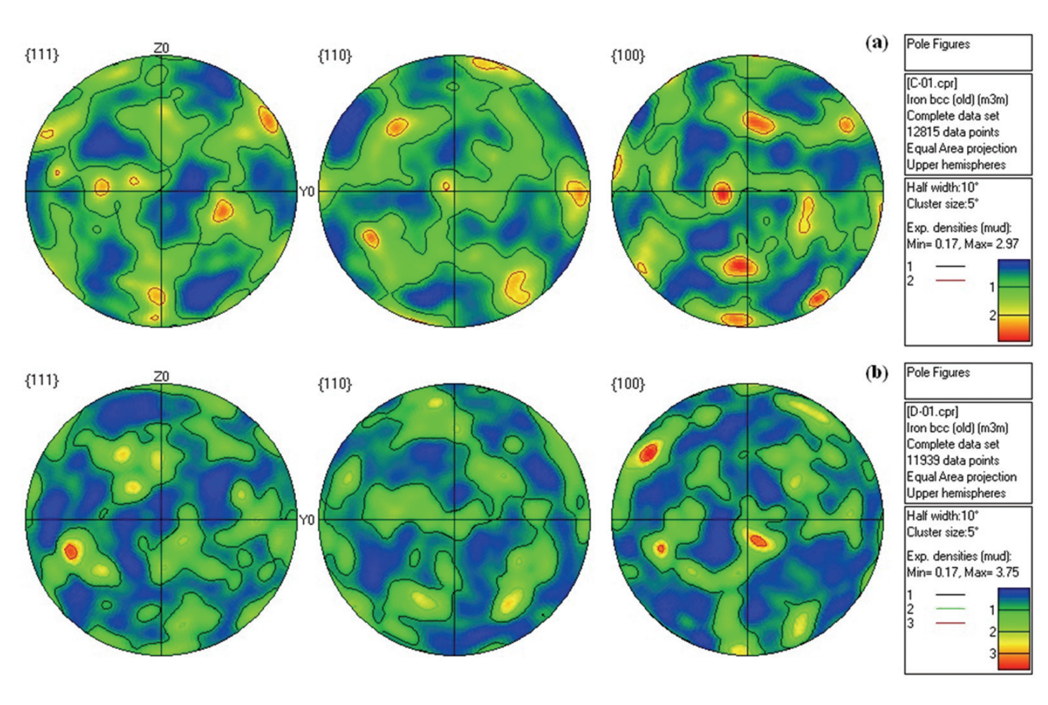


图9 在不同变形条件下离心铸造环坯极图

Fig.9 Pole figure of centrifugal casting ring blank under different deformation condition (a) at 1000℃/0.1 s^{-1} and (b) at 1100℃/0.1 s^{-1}

强, 有利于铸环坯材料塑性成形工艺性能的提高; 其原因是, 在变形程度较高时适中的应变速率使得旋转动态再结晶引起的小角度晶界迁移连续形成了大角度晶界。

3 结　论

1. 两种铸造Q235B环坯在1000℃/0.1 s^{-1}条件下真应变为1.2时动态再结晶的晶粒尺寸均较小, 有少量仍保持铸造状态的晶粒, 组织演变机理为动态回复和大应变几何动态再结晶; 离心铸造Q235B具有22%集中在20°-50°的大角度晶界。

2. 在1100℃/0.1 s^{-1}条件下真应变为1.2时两种铸造Q235B环坯的再结晶过程充分, 晶粒趋于等轴状, 动态再结晶的晶粒多分布在变形剧烈的晶粒边界及三角晶界处。晶界取向差分布仍呈现典型的双峰特征, 大角度晶界所占比例为60%-75%。

3.在1000℃/0.1 s^{-1}条件下砂型铸造环坯的织构组态为少量沿着<001>//ND取向线分布的{001}<100>立方织构和{001}<110>织构; 而在1100℃则为高斯织构{110}<001>和沿着<110>//ND向{110}<001>方向移动并聚集的旋转立方织构{110}<110>。在1000℃/0.1 s^{-1}条件下离心铸造Q235B的织构组态为旋转立方织构{110}<110>和铜型织构{112}<111>, Copper织构沿着ε-取向线分布; 而在1100℃/0.1 s^{-1}条件下主要为{001}<110>织构和沿着γ取向线由黄铜R{111}<112>向{111}<110>转变的织构, 再结晶程度高, 取向密度大。

参 考 文 献

1 LI Hongwei, YANG He, Prediction of texture evolution under varying deformation states through crystal plasticity finite element method, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **22**, s222(2012)

2 LI Hongwei, FENG Lu, YANG He, Deformation mechanism of cold ring rolling in view of texture evolution prediction by a new proposed polycrystal plasticity model, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **23**, 3729(2013)

3 S. V. S. Narayana Murty, N. Nayan, P. Kumar, P. R. Narayanan, S. C. Sharma, K. M. George, Microstructure-texture-mechanical properties relationship in multi-pass warm rolled Ti-6Al-4V alloy, Materials Science & Engineering A, **589**, 174(2014)

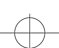
4 Valerie Randle, Olaf Engler, Introduction to texture analysis: macrotexture, micro-texture & orientation mapping, Gordon and Breach Science Publishers, London(2000)

5 TANG Weiqin, ZHANG Shaorui, FAN Xiaohui, LI Dayong, PENG Yinghong, Texture and its effect on mechanical properties of AZ31 magnesium alloy, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **20** (3), 271(2010)
(唐伟琴, 张少睿, 范晓慧, 李大永, 彭颖红, AZ31镁合金的织构对其力学性能的影响, 中国有色金属学报, **20**(3), 271(2010))

6 W. C. Jeong, Effect of hot-rolling temperature on microstructure and texture of an ultra-low carbon Ti-interstitial-free steel, Materials Letters, **62**, 91(2008)

7 K. Ryttberg, M. Knutson Wedel, V. Recina, P. Dahlman, L. Nyborg, The effect of cold ring rolling on the evolution of microstructure and texture in 100Cr6 steel, Materials Science and Engineering A, **527**, 2431(2010)

8 LI Yongtang, JU Li, QI Huiping, ZHANG Feng, CHEN Guozhen, WANG Mingli, Technology and experiments of 42CrMo bearing



ring forming based on casting ring blank, Chinese Journal of Mechanical Engineering, **27**(2), 417(2014)

9 CHEN Huiqin, BAI Jinxin, QI Huiping, FU Jianhua, LI Yongtang, Establishment of hot processing maps and hot ring rolling process of 42CrMo steel, Journal of Mechanical Engineering, **50**(16), 89 (2014)
(陈慧琴, 柏金鑫, 齐会萍, 付建华, 李永堂, 42CrMo钢热加工图的建立与热辗扩成形工艺, 机械工程学报, **50**(16), 89(2014))

10 J. A. Valle, M. Prado, O. A. Ruano, Texture evolution during large-strain hot rolling of the Mg AZ61 alloy, Materials Science and Engineering A, **355**, 68(2003)

11 S. E. Ion, F. J. Humphreys, S. H. White, Dynamic recrystallization and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium, Acta Metallurgica, **30**, 1909(1982)

12 LIU Xiao, LOU Yan, LI Luoxing, ZHU Biwu, HE Fengyi, Grain orientation and texture evolution of AZ31 magnesium alloy during hot compression, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **22**(8), 2141(2012)
(刘 筱, 娄 燕, 李落星, 朱必武, 何凤亿, AZ31镁合金热压缩过程中晶粒取向和织构的演变, 中国有色金属学报, **22**(8), 2141 (2012))

13 YANG Ping, *Technology and applications of electron backscatter diffraction*, (Beijing, Metallurgical Industry Press), 2007
(杨 平, 电子背散射衍射技术及其应用, (北京, 冶金工业出版社) (2007))

14 CHEN Jiaguang, CAO Shengquan, EBSD of microstructure in low carbon steel, Physics Examination and Testing, **23**(2), 1(2005)
(陈家光, 曹圣泉, 低碳钢显微结构的EBSD表征, 物理测试, **23** (2), 1(2005))

15 AN Jinmin, DING Yi, QIN Ming, Effect of rolling processes on the cold rolled texture in bcc metal, Baosteel Technology, **6**, 48(2013)
(安金敏, 丁 毅, 覃 明, 轧制工艺对体心立方金属冷轧织构的影响, 宝钢技术, **6**, 48(2013))

16 QIN Fangcheng, Hot deformation and microstructure evolution of Q235B based on casting-rolling compound forming, MD thesis, Taiyuan University of Science and Technology(2014)
(秦芳诚, 环件铸辗复合成形中Q235B钢热变形及组织演变研究, 硕士学位论文, 太原科技大学(2014))

17 YAN Honghong, LI Yongtang, HU Yong, LI Qiushu, ZHAO Dawen, CAO Zhengzheng, Study on the microstructure and mechanical properties of Q235B ring casting blank, Journal of Mechanical Engineering, **50**(14), 89(2014)
(闫红红, 李永堂, 胡 勇, 李秋书, 赵达文, 曹争争, Q235B环形铸坯显微组织和力学性能的研究, 机械工程学报, **50**(14), 89(2014))

18 R. K. Ray, J. J. Jonas, R. E. Hook, Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels, International Materials Reviews, **39**(4), 128(1994)

19 YANG Ping, GAO Peng, SUN Zuqing, Local deformation inhomogeneities in compressed low carbon steels, Materials Science Technology, **13**(6), 657(2005)
(杨 平, 高 鹏, 孙祖庆, 低碳钢压缩时的微观形变不均匀性, 材料科学与工艺, **13**(6), 657(2005))

20 WANG Zhigang, ZHAO Aimin, YE Jieyun, ZHAO Zhengzhi, Microstructure and textural evolution of micro-carbon DP steel during the heating stage of continued annealing process, Chinese Journal of Materials Research, **27**(16), 561(2013)
(汪志刚, 赵爱民, 叶洁云, 赵征志, 微碳DP钢在连续退火加热段的组织与织构演变, 材料研究学报, **27**(16), 561(2013))

